

META-ANÁLISIS DE CAPTURA DE CARBONO ATMOSFÉRICO EN MÉXICO A TRAVÉS DE AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN

MC. **Nidia Sarahí Reséndiz Flores** ^(a), Dr. **Emilio Jesús González Sánchez** ^(b),
Dr. **José Ignacio Caamal Cauich** ^(c), Dra. **Rosa María García Núñez** ^(d).

(a) Departamento de Ingeniería Rural, ETSIAM, Universidad de Córdoba, Ed. Leonardo Da Vinci, Campus Rabanales, Ctra. Nacional IV, Km. 396, 14014 Córdoba, España, y División de Ciencias Económico Administrativas, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de la DICEA, km. 38.5, Carr. México – Texcoco. CP 56230, Chapingo, México.

nisaref@gmail.com

(b) Asociación Española de Agricultura de Conservación Suelos Vivos (AEAC.SV), Centro IFAPA Alameda del Obispo, Av. Menéndez Pidal s/n, 14004 Córdoba, España. (c) División de Ciencias Económico Administrativas, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de la DICEA, km. 38.5, Carr. México - Texcoco. CP 56230, Chapingo, México. (d) Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de la DICEA, km. 38.5, Carr. México - Texcoco. CP 56230, Chapingo, Estado de México, México.

Resumen

Los Estados Unidos Mexicanos son signatarios del segundo período del Protocolo de Kyoto que comprende del 1 de enero de 2013 al 31 de diciembre de 2020 y cuyo objetivo primordial es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para limitar el aumento de la temperatura global a 2 °C (3.6 °F). Sin embargo los compromisos actuales en el marco del segundo período de compromiso del Protocolo de Kyoto claramente no son suficientes para garantizar que la temperatura se mantendrá por debajo del 2 °C. Como hay una brecha cada vez mayor entre la acción de los países y lo que la ciencia dice es necesario este tipo de trabajos y desarrollo en la investigación para la mitigación del cambio climático. El objetivo del presente estudio fue dotar de bases científicas sólidas a tomadores de decisiones e inferir en la factibilidad de compromisos propuestos en el Protocolo de Kyoto a 2020. En base al potencial que tiene la Agricultura de Conservación (AC) en México la función de reducir la concentración de CO₂ de la atmosfera a través de secuestro de C utilizando metodología relacionadas a 16 diferentes trabajos de investigación de la República Mexicana, a través de la aplicación de fórmulas para determinar el coeficiente de fijación de C. Los resultados demostraron que las técnicas de AC tienen el potencial para promover la fijación de C en el suelo de hasta 1.6 Gg año⁻¹ sobre la Agricultura Tradicional (AT). A lo que respecta que los coeficientes de fijación de C sean de 0.41 y 0.58 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para SD y ML, respectivamente; sean promisorios para la adopción de la AC en cada uno de los Estados Unidos Mexicanos.

Palabras clave: Agricultura de Conservación * Siembra directa * Mínima labranza * Fijación de carbono

1. Introducción

La agricultura es responsable de un tercio de las emisiones de GEI, principalmente dióxido de carbono (CO₂), aunque también metano (CH₄) y óxido

nitroso (N_2O). El CO_2 es requerido por las plantas para realizar la fotosíntesis, transformándolo en C que pasa a formar parte de sus estructuras. Este hecho es considerado como secuestro de carbono en el estudio del cambio climático, y reduce el efecto invernadero. La Agricultura de la conservación comprende unas técnicas de manejo de suelo que hacen compatibles las actividades productivas de los agricultores con tecnología flexible y adaptable acorde a las necesidades de cada productor con tres principios: mínimo movimiento de suelo, dejar restos de cosecha en la superficie después de cada cosecha y rotación de cultivos de acuerdo con Santoyo Cuevas (2014). En México: Iniciativa Mas Agro: actualmente liderado por SAGARPA y ejecutado por CIMMYT en conjunto con colaboradores recomiendan para capturar C atmosférico, con el efecto favorable que ello conlleva para paliar el efecto invernadero y alcanzar las premisas del segundo período (2013–2020) de Compromisos del Protocolo de Kioto.



Fig.1. Mapa de la República Mexicana. Los puntos representan las áreas donde los estudios fueron llevados a cabo.

El objetivo del presente estudio fue dotar de bases científicas sólidas a los tomadores de decisiones e inferir en la factibilidad de los compromisos propuestos en el Protocolo de Kyoto a 2020; en base al potencial que tiene la agricultura de conservación en México y con la función de reducir la concentración de CO_2 en la atmosfera a través de secuestro de C mediante el análisis de diferentes trabajos de investigación realizados en la República Mexicana.

2. Materiales y métodos

En este apartado se presentan aspectos generales relacionados con la fijación de C atmosférico en suelos agrícolas, y se analiza, especialmente, el impacto de la adopción de prácticas de AC frente a la utilización de Agricultura Tradicional (AT), en la reducción de emisiones de CO₂ en México. Para este estudio fueron revisados 16 artículos científicos de investigación de 9 Estados de la República Mexicana. (Fig. 1) y Tabla I). De acuerdo con la literatura revisada, el potencial para secuestro de carbono en particular para las prácticas de AC no siempre es igual y depende de varios factores como: clima del área, tipo de suelo y densidad y rotación de cultivos herbáceos.

Tabla 1. Lista de localizaciones y sistemas de manejo de suelos comparados

Región	Estado	Localización	Clasificación del suelo	Sistema de manejo del suelo
Norte	Sonora	Ciudad Obregón	Calcic Vertisol	SD vs. AT
	Tamaulipas	Río Bravo	Vertisol	SD, ML vs. AT
	Guanajuato	Celaya	Udic Vertisol	SD vs. AT
Centro	Tlaxcala	Hueyotlipán	Cambisol	SD, ML vs. AT
Occidente	México	Texcoco	Haplic Phaeozem	SD, ML, vs. AT
	Michoacán	Pátzcuaro	Andisol	SD vs. AT
		Casas Blancas	Andisol	SD, ML vs. AT
		Morelia	Vertisol	SD, ML vs. AT
		Apatzingán	Vertisol	SD, ML vs. AT
		Tepatitlán	Alfisol	SD, ML vs. AT
	Querétaro	Querétaro	Haplic Phaeozem	SD vs. AT
Sureste	Morelos	Tlaltizapán	Vertisol	SD, ML vs. AT
	Chiapas	Tapachula	Litosol	SD, ML vs. AT
		Tuxtla Chico	Rendzina	SD, ML vs. AT
		Frontera Hidalgo	Andisol	SD, ML vs. AT

Clasificación de acuerdo a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2003)

Referencias: SD, siembra directa; ML, mínima labranza y AT, agricultura tradicional

Cómo calcular el Coeficiente de Fijación de C

El análisis de efecto sumidero de C de la AC fue realizado a través de la literatura revisada en 2016, en estudios sobre sistemas de manejo de suelo que han tenido varios efectos en el contenido de MO sobre diferentes periodos. Dichos sistemas incluyen la SD y la ML en cultivos herbáceos. Para estimar el potencial de la AC para la captura de C, en cada estudio, el aumento de MO observado fue evaluado sobre AT. Para cada intervalo de profundidad del suelo estudiado i , aumenta C son presentados en términos de cantidades de C orgánico (CO) en el suelo.

La metodología realizada en esta investigación es la propuesta por González-Sánchez et al., (2012). De acuerdo con las siguientes formulas:

$$CO_i(Kg/ha) = CO_i(Kg_{CO}/100 Kg_{suelo}) \times \rho_i(Kg_{suelo}/m^3) \times D_i(m) \times 10^4 m^2/ha \quad (1)$$

$$CO_i(Mg/ha) = 10^{-3} CO_i(Kg/ha) \quad (2)$$

Donde ρ_i es la densidad aparente del suelo y D_i es la profundidad del intervalo estudiado. El contenido total de C es determinado por la profundidad total de los estudios D_t . La sumatoria de las cantidades obtenidas para cada profundidad de suelo del intervalo de muestra se realiza, como sigue:

$$CO_{Dt}AT(Mg/ha) = \sum_1^n CO_{i}AT \quad (3)$$

$$CO_{Dt}AC(Mg/ha) = \sum_1^n CO_{i}AC \quad (4)$$

Donde n es el número total de intervalos de profundidad en la experiencia que se está analizando. Este número de intervalos varía de un estudio a otro, ya que cada autor decide la profundidad total de la muestra. Por lo tanto, en un estudio j , determinado y revisado el promedio anual del crecimiento de C almacenado en los suelos bajo AC en comparación con AT a la profundidad total estudiada D_{tj} después de Y_j años de experiencia se obtiene como sigue:

$$\Delta CO_{Dtj}(Mg/haaño) = \frac{(CO_{Dtj}AC(Mg/ha) - CO_{Dtj}AT(Mg/ha))}{Y_j} \quad (5)$$

Donde ΔCO_{Dtj} es el coeficiente de la fijación anual de C para la revisión del estudio j . Para cada zona climática y la duración del estudio, se asocian incrementos de CO para diferentes profundidades totales D_t para cada estudio j revisado. El cálculo de la tasa media anual de fijación de C (FC) proviene de la media ponderada de estos aumentos, según la profundidad máxima de estudio en cada lugar y período considerado, como sigue:

$$FC(Mg/haaño) = \frac{\sum_{j=1}^{j=s} \Delta CO_{Dtj} \times D_{tj} / D_{tmax}}{S} \quad (6)$$

Donde FC, es el coeficiente de fijación de C media anual. D_{tmax} es la máxima profundidad del muestreo total de todos los estudios correspondientes a la zona climática y el período de tiempo considerado. S es el número total de estudios correspondientes a la zona climática y el período de tiempo considerado.

Resultados y Discusión

Los resultados presentados por los autores pueden ser muy diferentes y dependen de la zona donde se realizó el estudio, debido a la importancia del clima, tipo de suelo en el ciclo del C. Otros factores que influyen y pueden diferenciar los resultados son la densidad y profundidad del perfil considerado en el estudio, así como las rotaciones de cultivos. Existe una gran variabilidad en el potencial de estas técnicas para fijar C; por lo tanto, no hay un solo valor de captura de C que se aplique a una práctica de AC en particular. Según González-Sánchez *et al* (2012), el aumento de niveles de MO bajo AC depende del sistema de manejo del suelo y otros factores involucrados, tales como las condiciones climáticas de suelo (humedad y temperatura), composición bioquímica del material orgánico, disponibilidad de nutrientes y nivel de perturbación del suelo.

Coeficientes de fijación de C para SD

La tabla II muestra los incrementos de C para la SD comparada con AT. Según los artículos revisados se demuestra que la SD y la conservación de residuos estimulan el secuestro de C para reducir la erosión del suelo, la lixiviación y la escorrentía de productos químicos agrícolas; los cuales son benéficos para la captura de C.

La materia orgánica del suelo es importante en el ciclo del carbono terrestre a nivel mundial; ya que aproximadamente el 74% del CO activo se almacena en los suelos (Paustian *et al.* 1997). El manejo de los sistemas agrícolas y especialmente la retención de los residuos del cultivo puede tener un importante impacto en el contenido de MO del suelo (Govaerts *et al.*, 2007) y su composición (West y Post 2002). La SD favorece los agregados estables y protege físicamente la MOS por lo tanto la reducción de las tasas de mineralización (Lichter *et al* 2008).

La rotación de cultivos, retención de residuos y reducción de la labranza dará lugar al aumento del contenido de C. La mayoría de los sitios de experimentación presenta una tendencia positiva con SD, al no labrar las tierras para los cultivos; es decir presentan aumentos superiores a uno, lo cual conlleva a efectos favorables del secuestro de C con AC, tanto en climas Bs (secos esteparios) con una media de 1,28 Mg ha⁻¹ año⁻¹, así como en los Cw (templado con lluvias en verano) con un promedio de 1.21 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y para el tipo de clima Aw (tropical con lluvias en verano), una media de 1.05 Mg ha⁻¹.

La rotación de los cultivos es un elemento preponderante de cara a la AC y es necesario evaluar aún más sus efectos. En estos trabajos se detectó un efecto positivo en la simbiosis de maíz-trigo y en los monocultivos de maíz; sin embargo también se hallaron casos de trigo-cebada-maíz y maíz-frijol de igual manera con efectos positivos.

Tabla II. Lista de estudios referidos al incremento de Siembra Directa con diferentes tipos de clima

Estudio	Clima	Periodo de Estudio (años)	Máxima Profundidad de suelo muestreada (cm)	Incremento de C sobre labranza Tradicional (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Secuencia de cultivos ^a
MS (Monneveux et al., 2005)	Aw	1	30	1,03	Monocultivo de maíz
TL (Covaleda et al., 2008)	Cw	4	20	1,40	Trigo- cebada-maíz
GT (Follett et al., 2004)	Bs	5	30	1,07	Maíz-trigo y maíz-frijol
MN1 (Roldán et al., 2003)	Cw	5	15	1,34	Monocultivo de maíz
MN2 (Salinas et al., 2001)	Cw	6	15	1,11	Monocultivo de maíz
MN3 (Salinas et al., 2000)	Cw	6	5	1,31	Monocultivo de maíz
MC1 (Govaerts et al., 2007)	Cw	6	20	1,07	Maíz-trigo
MC2 (Patiño et al., 2008)	Cw	6	20	1,11	Maíz-trigo
MC3 (Fuentes et al., 2009)	Cw	16	10	0,93	Maíz-trigo
MC4 (Fuentes et al., 2008)	Cw	16	20	0,97	Maíz-trigo
MC5 (Dendooven et al., 2012)	Cw	10	60	1,69	Maíz-trigo
TS1 (Roldán et al., 2005)	Bs	3	15	1,02	Monocultivo de maíz
TS2 (Roldán et al., 2005)	Bs	3	15	1,29	Monocultivo de trigo
SR (Govaerts et al., 2005)	Bw	12	7	1,10	Maíz-trigo
CS (Baéz et al., 2011)	Aw	1	40	1,08	Monocultivo de maíz
QT (Mora et al., 2014)	Bs	8	5	1,73	Monocultivo de maíz
Promedio			20,44	1,21	
Desv Est (p< 0,05)				0,24	

MS, Morelos; TL, Tlaxcala; GT, Guanajuato; MN, Michoacán; MC, Estado de México; TS, Tamaulipas; SR, Sonora; CS, Chiapas; QT, Querétaro

^a Nombres científicos: *Zea mays* L.; *Triticum* L.; *Hordeum vulgare* L.; *Phaseolus vulgaris*.

Coeficientes de fijación de C para ML

En la Tabla III se presentan 5 estados de la República Mexicana que disminuyeron la AT a ML, que se define como una práctica agronómica de AC en cultivos anuales, en la que las únicas labores de alteración del perfil del suelo que se realizan son de tipo vertical y, al menos un 30% de su superficie se encuentra cubierta por restos vegetales.

Tabla III. Lista de estudios referidos al incremento de Mínima Labranza con diferentes tipos de clima

Estudio	Clima	Periodo de Estudio (años)	Máxima profundidad de suelo muestreada (cm)	Incremento de C sobre AT ($\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$)	Secuencia de cultivos ^a
TL (Covaleda et al., 2008)	Cw	4	20	1,24	Trigo-Cebada-Maíz
MN1 (Roldán et al., 2003)	Cw	5	15	1,26	Monocultivo de maíz
CM1 (Govaerts et al., 2007)	Cw	6	20	1,00	Maíz-Trigo
CM2 (Patiño et al., 2008)	Cw	6	20	1,01	Maíz-Trigo
TS1 (Roldán et al., 2005)	Bs	3	15	1,00	Monocultivo de maíz
TS2 (Roldán et al., 2005)	Bs	3	15	1,08	Monocultivo de Trigo
CS (Báez et al., 2011)	Aw	1	40	1,18	Monocultivo de maíz
Promedio			20,71	1,11	
Desv Est				0,11	

TL, Tlaxcala; MN, Michoacán; MC, Estado de México; TS, Tamaulipas; CS, Chiapas.^a Nombres científicos: *Zea mays* L.; *Triticum* L.; *Hordeum vulgare* L.

Resultados revisados indican que la adición de los residuos orgánicos previamente cultivados utilizando la AT, favorece claramente la acumulación de materia orgánica del suelo (MOS) en comparación con el tratamiento tradicional (Baumann and Werner, 1997; Etchevers and Brito, 1997; Báez et al., 2002).

Estas prácticas de AC de SD y ML resultan una mejora para la acumulación de COS, ya que en esta investigación se obtiene un aumento en promedio de 1,11 y 1.21 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ con ML y SD; es decir, existe una diferencia de 0,10 $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Con esto se comprueba que el mejor incremento es con SD sobre la AT. A diferencia de otros trabajos (González et al., 2012) en nuestro caso, el ML siempre supuso incrementos de C en el suelo. El boletín de Suelos de la FAO No. 78 (2002) menciona que los agricultores por lo general usan la ML en situaciones muy específicas: por ejemplo, para cambiar de cultivo pues antes de

la siembra del segundo cultivo; la tierra se limpia. Este trabajo no es la excepción. Se presenta un aumento máximo de 1,26 y un mínimo de 1,00 Mg ha⁻¹ año⁻¹; respectivamente, de C sobre la AT.

Los tipos de climas tan diversos que existen en México afectan en algunos casos tanto positiva como negativamente. En la figura 2 se aprecia una media de los 4 tipos de climas identificados; el C capturado en Mg ha⁻¹ año⁻¹ con cada clima.

Aunque parecería alto en el clima Bs que es el seco estepario con la práctica de SD, se debe a que el estudio de Querétaro con 8 años de transición de AT a AC inicio con un 1.5 % al 2013 incremento a 2.6% de MOS con lo cual se mejoró la fertilidad del suelo, disminuyó la utilización de grandes cantidades de fertilizantes. Asimismo, la MO ayuda a retener más la humedad y nutrientes, permitiendo un mejor aprovechamiento (Mora, 2014).

Siembra Directa y Mínima Labranza

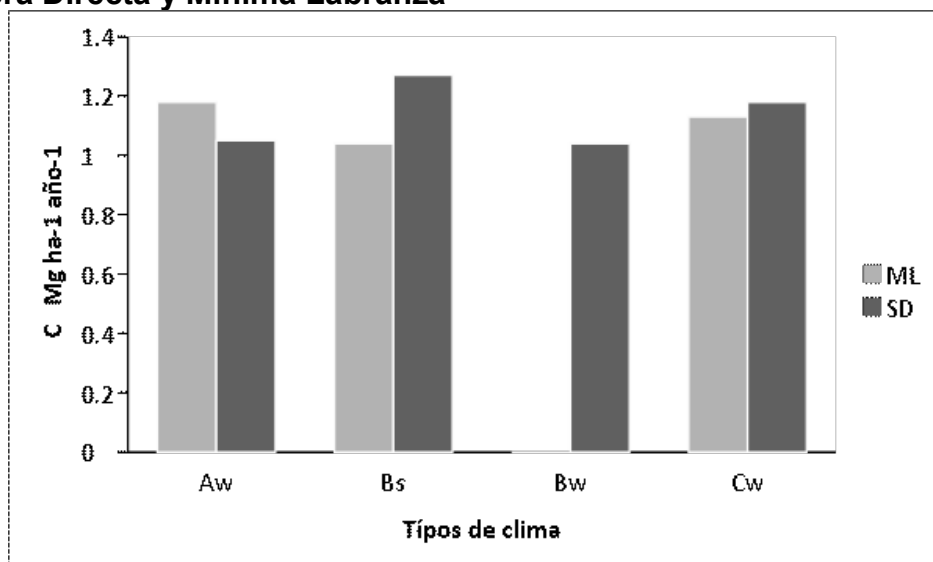


Figura 2. Fijación de C en SD y ML para Climas Tropical con lluvias en verano (Aw), Seco estepario (Bs), Seco desértico (Bw) y Templado con lluvias en verano (Cw).

Promedio Potencial de Fijación de CO₂ basado en la superficie bajo AC en México

Se realizó una evaluación de los coeficientes estimados y representa la reducción de las emisiones de GEI en México, teniendo en cuenta el porcentaje de tierra cultivable ocupada por cultivos bajo AC.

Al respecto, datos oficiales en México se presentan en la Encuesta Nacional Agropecuaria realizada por INEGI, 2014; en donde se aprecia el aumento de superficie con AC en 2012 (Tabla IV).

Dados esos valores del uso de la tierra en México en cultivos bajo AC, la fijación potencial de C en México son presentados en la Tabla 5 para SD y ML. En base a la investigación realizada y los datos de superficie agrícola en México dedicada a la AC, se concluye que alrededor de 1.6 Gg C pueden ser fijadas

cada año sobre la AT, así el sumidero de C en el suelo es un efecto promovido por la AC. Se considera que la ML obtiene un coeficiente de FC superior al de SD debido a que son tierras que se encuentran en transición y se incluye durante la siembra la retención de residuos.

Tabla IV. Área cultivada bajo Agricultura de Conservación en México.

	Cultivos arables (2014)	%	Cultivos arables (2012)	%
Total (ha)	27.496.118	100	25.808.000	100
SD (ha)	1.502.392	34,3	972.394	22,2
ML (ha)	1.756.199	26,6	1.294.041	19,6

Elaboración propia con datos de la ENA-INEGI, 2014.

Tabla V. Área cultivada en México bajo Agricultura de Conservación (2014) y potencial de Fijación de C sobre la Agricultura Tradicional

Practica Agrícola	Coeficiente de Fijación de C ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Área (ha)	Potencial de Fijación de C (Mg año^{-1})
SD	0,41	1.502.392	617.085,64
ML	0,58	1.756.199	1.010.746,78
Total		3.258.591	1.627.832,42

4. Conclusiones

La aplicación de AC es una herramienta que ayudaría a incentivar a los productores a adoptar estas técnicas de producción por sus múltiples beneficios y al Gobierno de México a emitir nuevas políticas públicas que beneficiarían la producción agrícola sostenible. Debido a la influencia de las características del suelo, profundidad, al período de tiempo con labores conservacionistas y del clima con potencial para fijación de C. Sin embargo, no es totalmente recomendable para informar sobre la mitigación de los GEI pero sí coadyuva a realizar informes sobre el sector agropecuario de cara a hacer frente a los compromisos pactados en el segundo periodo del Protocolo de Kyoto (2012-2018) del Gobierno. La aplicación de la AC en México está actualmente en transición. Se espera que este trabajo ayude a la adopción de estas prácticas de conservación en todos los Estados de México y a su vez contribuya a la mitigación del Cambio climático Global.

Citas bibliográficas

Santoyo Cuevas E. Agricultura de Conservación, tecnología con futuro en el Estado de México. México: Secretaria de Desarrollo Agropecuario. SEDAGRO_ICAMEX. 2014.

- González-Sánchez EJ, Ordóñez-Fernández R, Carbonell-Bojollo R, Veroz-González O, Gil-Ribes JA. Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through the use of conservation agriculture. *Soil Till Res* 2012, 122:52-60.
- González-Sánchez EJ, Veroz-González O, Blanco-Roldán G.L, Marquez-García F, Carbonell-Bojollo R. A renewed view of conservation agriculture and its evolution over the last decade in Spain. *Soil and Tillage Research* 2015, 146: 204–12.
- Govaerts B, Sayre KD, Lichter K, Dendooven L, Deckers J. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. *Plant Soil* 2007, 291:39–54.
- Lichter K, Govaerts B, Six J, Sayre KD, Deckers J, Dendooven L. Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in the permanent raised-bed planting system in the Highlands of Central Mexico. *Plant Soil* 2008; 305:237–52.
- Baumann J, Werner G. Nutrient supply of reclaimed indurated volcanic ash soils and evaluation of productivity with the QUEFTS-model. In: Zebrowski C., Quantin P., Trujillo, G. (Eds.), *Suelos volcánicos endurecidos*. ORSTOM, Quito, 1997 p. 194–201.
- Etchevers JD, Brito H. Levantamiento nutrimental de los tepetates de México y Tlaxcala. In: Zebrowski, C, Quantin, P, Trujillo, G. (Eds.), *Tercer Simposio Internacional: suelos volcánicos endurecidos*. ORSTOM, Quito, 1997, p. 202–212.
- Báez A, Etchevers JD, Hidalgo C, Prat C, Ordaz V, Núñez R. C orgánico y P-Olsen en tepetates cultivados de México. *Agrociencia* 2002; 36: 643–53.
- Mora Gutiérrez M. Evaluación de 12 variedades de maíz en labranza de conservación en el módulo demostrativo Regina. INIFAP-SAGARPA- Fundación PRODUCE Querétaro y Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Querétaro. Despegable. 2014.
- FAO. Boletín de Suelos de la FAO No.78. Agricultura de Conservación. Estudio de Casos en América Latina y África. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 2002.